

Conference Paper, Published Version

Vogel, Paul; Grabe, Jürgen

Mobilisierter Erddruck auf Widerlager integraler Brücken

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106584>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Vogel, Paul; Grabe, Jürgen (2019): Mobilisierter Erddruck auf Widerlager integraler Brücken. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Numerik in der Geotechnik. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 59-64.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Mobilisierter Erddruck auf Widerlager integraler Brücken

Paul Vogel M. Sc, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Grabe
(Institut für Geotechnik und Baubetrieb, Technische Universität Hamburg)

1. Einleitung

Integrale Brücken zeichnen sich durch ihre monolithische Bauweise aus. Durch die Temperaturbelastung, deren Extremwerte einem jährlichen Zyklus unterliegen, treten Zwangsbeanspruchungen auf, deren Größe abhängig vom Steifigkeitsverhältnis zwischen Über- und Unterbau sowie von der Steifigkeit der Hinterfüllung ist. Die Boden-Bauwerk-Interaktion beeinflusst somit die Bemessung integraler Brücken. Die Steifigkeit der Hinterfüllung wird gemäß RE-ING (2016) durch einen oberen und unteren Grenzwert für den anzusetzenden Erddruck abgebildet. In diesem Ansatz werden wichtige Parameter wie das zyklische Spannungs-Dehnungs-Verhalten infolge Temperaturschwankungen, teilgesättigte Bodenverhältnisse, die für eine optimale Verdichtung notwendig sind, sowie der Verdichtungsprozess selbst vernachlässigt. Der Einfluss dieser Parameter wird experimentell und numerisch untersucht, um Empfehlungen für den Ansatz der Steifigkeit bzw. des einwirkenden Erddrucks zur Bemessung integraler Brücken abzuleiten.

2. Laborversuche: 1g-Modell

Der Prüfstand ist in Bild 1 dargestellt und besteht aus einem Tank mit den Innenmaßen 82 cm x 92 cm x 52 cm, einer beweglichen Wand, einem Antriebssystem mit Lastsensoren sowie Erddruckmessgeräten und Tensiometern. Die Wandbewegung ist in Richtung und Geschwindigkeit über das Antriebssystem steuerbar womit das zyklische Bewegungsverhalten erzeugt wird. Vereinfachend wird die Verformung des Widerlagers mit einer Fußpunktverdrehung gleichgesetzt. Der untersuchte Boden (Hamburger Sand) ist ein Grobsand mit mittelsandigen Anteilen, der gemäß ZTV E-StB (2017) als Hinterfüllmaterial eingesetzt werden kann. Zur Berücksichtigung eines realistischen Verdichtungsprozesses wird der teilgesättigte Sand mit einem optimalen Wassergehalt von $w_{pr} = 10\%$ in drei Schichten je 10 cm Höhe eingebaut und mit einem Schlaghammer, der eine Fallmasse von 7,52 kg besitzt, schichtweise verdichtet.

3. Numerische Simulation der Laborversuche

Die numerischen Simulationen werden mit der Finite-Elemente-Methode (Abaqus Standard, Version 6.14) durchgeführt. Das 2D-Modell (Bild 1) besteht zum einen aus einer Widerlagerwand, welche als *rigid body* modelliert wird und eine zyklische Drehung um den Referenzpunkt am Fußpunkt der Wand ausführen kann und zum anderen aus einem Bodenkörper für den ein geeigneter Ansatz zur Modellierung granularer Böden das hypoplastische Stoffmodell nach von Wolffersdorff (1996) ist. Zur Verbesserung des Stoffmodells hinsichtlich des Verhaltens in kleinen Dehnungsbereichen, die bei der Widerlagerverformung zu erwarten sind, wird die Erweiterung um die intergranularen Dehnungen nach

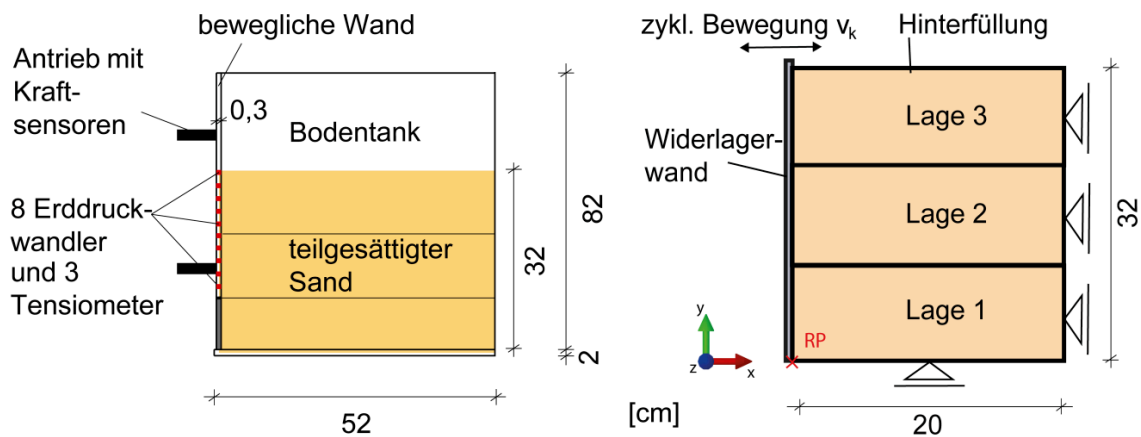


Bild 1: Versuchsaufbau 1g-Modell (links) und numerisches Modell (rechts)

Niemunis & Herle (1997) verwendet. Für die Abbildung des hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhaltens des Bodens wird auf das in Abaqus Standard implementierte empirische Modell für die Kapillardruck-Sättigungsbeziehung nach van Genuchten (1980) sowie auf einen statistischen Ansatz zur Beschreibung der teilgesättigten Durchlässigkeit nach Mualem (1976) zurückgegriffen.

Zur Berücksichtigung des Verdichtungsprozesses wird das Modell in drei gleiche Schichten unterteilt, die mittels der *model-change* Funktion in Abaqus schrittweise eingebaut und verdichtet werden. Zu Beginn wird von einer unverdichteten Sandschicht mit einer Porenzahl von $e = 0,78$ [-] ausgegangen. Durch die simulierte Verdichtung soll sich gemäß der Labortests eine Porenzahl von $e = 0,70$ [-] einstellen. Zunächst wird nur die erste Lage aktiviert, die beiden anderen Schichten werden mit der *model-change* Funktion ausgeschaltet. Anschließend wird auf die erste Schicht eine zyklische Verdichtungslast nach Pankrath (2014) aufgebracht, die die Verdichtung im 1g-Modellversuch durch den Schlaghammer simulieren soll. Die zyklische Wandbewegung wird durch einen zeitlich veränderlichen Neigungswinkel in Form einer Sinusfunktion am Bezugspunkt RP erzeugt (vgl. Bild 1, rechts).

4. Einfluss der Verdichtung

Die Erddruckverteilung entlang der Wandhöhe aus den experimentellen und numerischen Untersuchungen ist in Bild 2 dargestellt. Zunächst kann gezeigt werden, dass sowohl in den Laborversuchen als auch mit der Numerik ähnliche Ergebnisse für den Verdichtungserddruck in den verschiedenen Schichten erzielt wurden.

Allgemein kann dabei festgestellt werden, dass nach der Verdichtung der drei Schichten ein Anstieg des Erddrucks über den Erdruhedruck hinaus erfolgt. Besonders auffällig ist, dass die Verdichtung der oberen Schicht einen signifikanten Einfluss auf den Erddruck am Boden der Wand hat. Dies widerspricht den aktuellen Ansätzen des Verdichtungserddrucks nach Spotka (1977), die nur einen Anstieg des Erddrucks in den oberen Bereichen durch schichtweise Verdichtung beschreiben. Allerdings ist ein Vergleich mit den Ansätzen von Spotka (1977) aufgrund von Skalierungseffekten bezüglich der geringen Schichtdicken und der im Verhältnis zur Schichtdicke aufgetragenen Verdichtungslast nur bedingt möglich. Infolgedessen wurden Simulationen im Großmaßstab durchgeführt, auf die im weiteren Verlauf eingegangen wird.

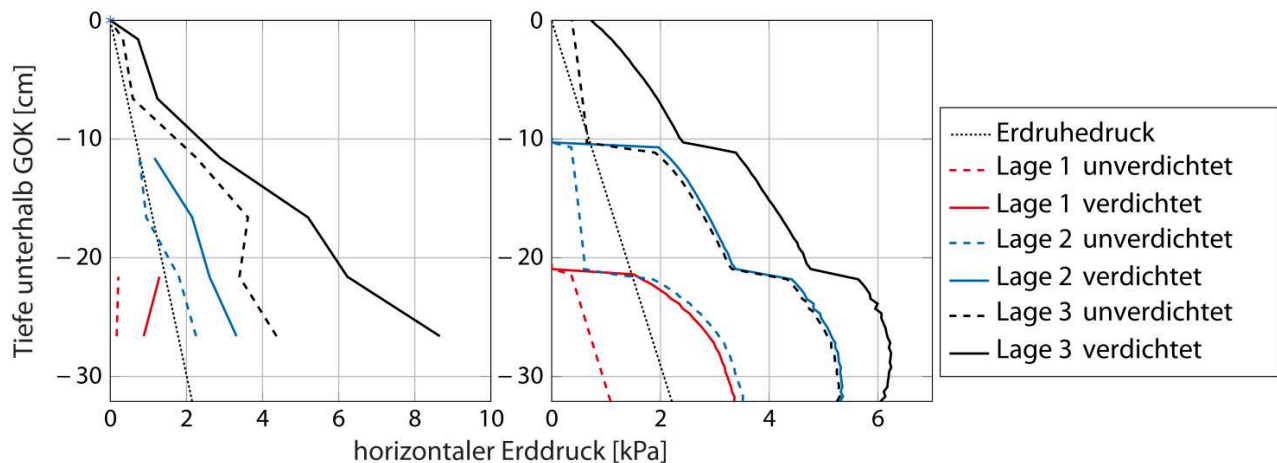


Bild 2: Erddruck nach lagenweiser Verdichtung: Labor (links) und Numerik (rechts)

5. Einfluss der zyklischen Wandbewegung

Der Einfluss der zyklischen Wandbewegung ist in Bild 3 links anhand der numerischen Simulation für eine untersuchte Zyklenanzahl von $n = 40$ dargestellt. Zunächst kann festgestellt werden, dass eine langfristige zyklische Belastung einen deutlichen Einfluss auf den mobilisierten Erddruck hat. Auffällig ist, dass im unteren Widerlagerbereich nahe dem Fußpunkt (31 cm unter GOK) ein antizyklisches Verhalten des Erddrucks im Vergleich zum Erddruck in höheren Bereichen beobachtet wird.

Allgemein lässt sich mit fortschreitender zyklischer Belastung ein Abfall des aktiven und passiven Erddrucks im unteren und mittleren Wandbereich (20 – 31 cm unter GOK) feststellen. Darüber hinaus wird die Amplitude in diesem Bereich kleiner, was eine abnehmende Differenz zwischen aktivem und passivem Erddruck für die Langzeitnutzungsdauer integraler Brücken darstellt. Am oberen Rand der Hinterfüllung (3 cm unter GOK) ist die Entwicklung zunächst ähnlich, jedoch steigt der passive Erddruck in der Sommerposition (Ausdehnung des Überbaus) mit zunehmender Anzahl der Zyklen wieder leicht an, siehe Bild 3 (links). Dies deutet auf eine Verdichtung der oberen Schichten hin.

Weiterhin fällt auf, dass der mobilisierte Erddruck nahe der Geländeoberkante in der Winterposition (Verkürzung des Überbaus) auf eine Restspannung nahe Null abfällt, was den effektiven Spannungen aus der Teilsättigung in den numerischen Simulationen entspricht. In den Laborversuchen wurde in diesem Fall eine freie Standhöhe des Sandes beobachtet, die auf eine erhöhte Scherfestigkeit des Bodens im teilgesättigten Zustand zurückzuführen ist. Weitere Ergebnisse zu den Auswirkungen der Teilsättigung sind in Grabe (2019) dargestellt.

Des Weiteren kann dem Bild 3 (links) entnommen werden, dass mit fortschreitender zyklischer Belastung diese freie Standhöhe zunimmt. Anhand der Ergebnisse im mittleren Höhenbereich (20 cm unter GOK) kann festgestellt werden, dass bei hoher Zyklenanzahl $n = 30$ der mobilisierte Erddruck in der Winterposition ebenfalls nahe Null abfällt. Die Abnahme des Erddrucks mit zunehmender Zyklenanzahl kann durch die bleibende Verformung des teilgesättigten Sandes erklärt werden. Der Sand wird durch den wiederholten Wechsel der Ausdehnung und Verkürzung des Überbaus eingedrückt, was sich in der Verringerung des Erddrucks bei konstanter Wandverschiebung äußert.

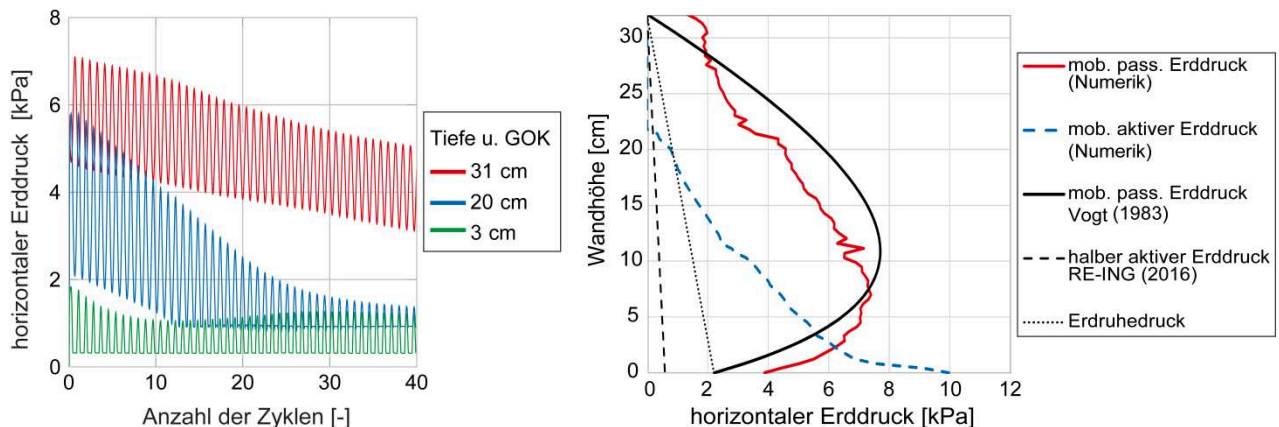


Bild 3: Ergebnisse zum mobilisierten Erddruck infolge Zyklik (links) und im Vergleich zu den Bemessungsansätzen der RE-ING (2016) (rechts)

6. Vergleich der Erddruckansätze

Auf Grundlage der vorgestellten Ergebnisse der Laborversuche und der numerischen Simulationen kann unter Berücksichtigung der untersuchten Parameter im Modellmaßstab ein Ansatz für den mobilisierten Erddruck in der Winter- und Sommerstellung erstellt werden, siehe Bild 3 (rechts). Zum Vergleich sind die Ansätze der RE-ING (2016) für den aktiven und passiven Erddruck dargestellt. Der Ansatz des mobilisierten passiven Erddrucks für die Sommerstellung gemäß RE-ING (2016) basiert auf den Untersuchungen von Vogt (1983). Hierfür kann eine ausreichend genaue Übereinstimmung festgestellt werden.

Nach RE-ING (2016) muss die Hälfte des aktiven Erddrucks als untere Grenze für den einwirkenden Erddruck bei einer Verkürzung des Überbaus angesetzt werden. In diesem Fall weicht der in den Untersuchungen ermittelte mobilisierte Erddruck deutlich von diesem Ansatz ab (vgl. Bild 3, rechts). Auffällig ist, dass sich in den oberen Bereichen infolge Teilsättigung eine freie Standhöhe einstellt, die durch einen nicht vorhandenen Erddruck markiert wird. Des Weiteren sind die Spannungen in den unteren Wandbereichen erheblich höher und übersteigen sogar die Werte des Erdruchedrucks.

7. Numerische Untersuchung im Großmaßstab

Zusätzlich zu den Simulationen im Modellmaßstab wurden Simulationen an einem Modell mit realen Abmessungen durchgeführt, um die Einflüsse der untersuchten Parameter im Großmaßstab qualitativ zu analysieren. Das Modell unterscheidet sich zu dem in Bild 1 (rechts) nur durch eine höhere Widerlagerwand von 7,5 m Höhe und einer Unterteilung des Bodenkörpers in 15 Verdichtungsschichten mit jeweils einer Höhe von 0,50 cm. Die Ergebnisse bezüglich des Erddrucks sind in Bild 4 dargestellt.

In der linken Abbildung ist der Erddruck vor und nach der Verdichtung ausgewählter Schichten im Vergleich zum Erdruchedruck aufgetragen. Vergleichend zu den Ergebnissen im Modellmaßstab hat in diesem Fall eine Verdichtung der eingebauten Schicht keinen Einfluss auf den Erddruck in tieferen Schichten. Der Einfluss der Verdichtung ist jeweils nur im oberen Bereich von Bedeutung und führt zu einer Erddruckzunahme. Im Endzustand, wenn die Hinterfüllung fertiggestellt ist, kann beobachtet werden, dass gemäß den Ansätzen nach Spotka (1977) der Verdichtungserddruck in den oberen

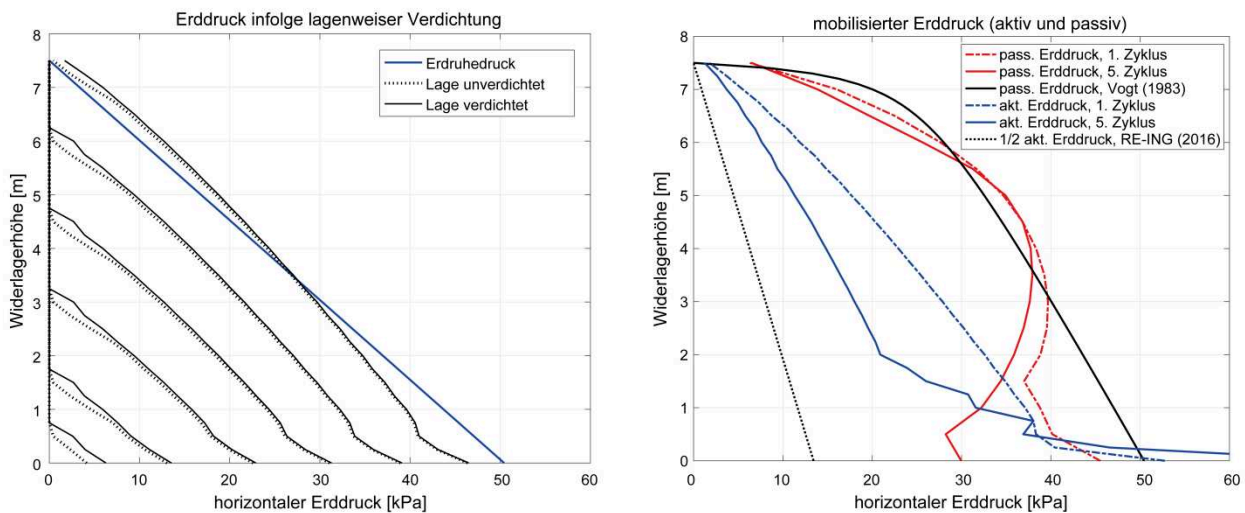


Bild 4: Ergebnisse der Simulation im Großmaßstab: lagenweise Verdichtung vor Beginn der Zyklik (links) und mobilisierter Erddruck infolge zyklischer Belastung (rechts)

Schichten bis in eine Tiefe von 3,5 m den Erdruehdruck übertrifft. Die Skalierungseffekte, die hierzu im Modellmaßstab aufgezeigt wurden, werden durch die Betrachtung im Großmaßstab obsolet. Des Weiteren fällt auf, dass in den unteren Schichten der Verdichtungserddruck unter den Erdruehdruck abfällt. Dieses Verhalten wurde auch durch Messungen von Vogt (1983) infolge Verdichtung der Hinterfüllung von Stützwänden festgestellt.

Rechts in Bild 4 ist der mobilisierte aktive und passive Erddruck für verschiedene Zyklen und der äquivalente Ansatz nach RE-ING (2016) dargestellt. Ähnlich den Modellversuchen (Bild 3, rechts) ist für den mobilisierten passiven Erddruck eine gute Übereinstimmung mit dem Ansatz nach Vogt (1983) erzielt worden. Lediglich in den unteren Wandbereichen wird ein geringerer Erddruck ermittelt, der durch die zyklische Belastung weiter abnimmt. Dieser Unterschied zu dem Ansatz von Vogt (1983) kann dadurch erklärt werden, dass für diesen nur der Erddruck des ersten Zyklus ausgewertet und eine langfristige zyklische Belastung nicht berücksichtigt wurde. Somit ist eine Abnahme des passiven Erddrucks in den unteren Widerlagerbereichen nicht auszuschließen.

Auch für den aktiven Erddruck sind mit den großmaßstäblichen Simulationen vergleichbare Ergebnisse wie in den Modellversuchen ermittelt worden. Der mobilisierte aktive Erddruck übertrifft auch in diesem Fall deutlich den Ansatz der RE-ING (2016). Allerdings wird mit fortschreitender Zyklik ebenfalls eine Abnahme des Erddrucks registriert, die bei einer längerfristigen zyklischen Belastung zu einer Annäherung des mobilisierten aktiven Erddrucks an die Werte der RE-ING (2016) führt.

Um die Auswirkung der aufgezeigten Unterschiede in den Erddruckansätzen zu bestimmen, wurde eine statische Vergleichsrechnung an einer elastisch gelagerten Rahmenbrücke mit einer Widerlagerhöhe von entsprechend 7,5 m und einer Spannweite von 30 m durchgeführt. Betrachtet man lediglich die Schnittgrößen der Widerlagerwand infolge Erdlasten, so resultieren aus dem mobilisierten passiven Erddruck um ca. 8 % geringere Biegemomente als mit dem Ansatz nach Vogt (1983). Beim Vergleich des aktiven Erddrucks entstehen aufgrund der größeren Differenzen in den Ansätzen ca. 230 % größere Biegemomente, die allerdings relativ gesehen vernachlässigbar gering sind. Allgemein sind die Beanspruchungen der Rahmenbrücke infolge des einwirkenden Erddrucks, unabhängig davon welcher Ansatz untersucht wird, im Vergleich zu den Beanspruchungen aus Verkehrs- und sogar Eigengewichtslasten vernachlässigbar gering.

8. Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde anhand experimenteller und numerischer Untersuchungen der Einfluss eines zyklischen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens, teilgesättigter Bodenverhältnisse sowie von Verdichtungsprozessen auf die Steifigkeit der Hinterfüllung von integralen Brücken analysiert.

Zunächst kann festgestellt werden, dass die numerischen Modelle die Laborversuche ausreichend genau simulieren können. Insbesondere konnte die numerische Modellierung eines Bodens im teilgesättigten Zustand erreicht werden. Grundsätzlich liefert das durch die Laborversuche validierte numerische Modell umfassende Erkenntnisse, aus dem der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Boden-Bauwerk-Interaktion integraler Brücken abgeleitet werden kann. Besonders zu erwähnen ist die Abhängigkeit des mobilisierten Erddrucks von der zyklischen Wandbewegung und der dadurch kontinuierlichen Abnahme des Erddrucks bei der Betrachtung langfristiger Zyklik. Weiterhin kann mit numerischen Methoden der Verdichtungsprozess hinterfüllter Bauwerke abgebildet werden.

Es konnte darüber hinaus festgestellt werden, dass die erzielten Ergebnisse für die Sommerstellung annähernd dem mobilisierten Erddruckansatz nach Vogt (1983) in der RE-ING (2016) entsprechen, der für die Bemessung integraler Brücken angesetzt wird. Unterschiede bestehen für den mobilisierten Erddruck in der Winterstellung, da dieser deutlich über den Ansatz der RE-ING (2016) hinausgeht. Diese Ergebnisse konnten ebenfalls mit einer qualitativen Simulation im Großmaßstab nachempfunden werden. Durch eine Vergleichsrechnung der verschiedenen Erddruckansätze konnten jedoch keine nennenswerten Auswirkungen bzw. Änderungen auf die Beanspruchung der in dieser Arbeit untersuchten integralen Rahmenbrücke bestimmt werden.

Literatur

- Grabe, J. & Vogel, P. & Rombach, G. 2019. Investigation of the soil structure interaction of integral bridges. *Advances in Engineering Materials, Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications*. London: CRC Press.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12(3), 513-522.
- Niemunis, A. & Herle, I. 1997. Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials* 2.4., 279–299.
- Pankrath, H. 2014. Simulation dynamischer Bodenverdichter und Ansätze zur klein und großskaligen Validierung. *Simulia Regionale Anwender Konferenz*, Dresden.
- RE-ING. 2016. Richtlinie für den Entwurf, die konstruktive Ausbildung und Ausstattung von Ingenieurbauten (RE-ING), Teil 2 Brücken, Abschnitt 5 Integrale Bauwerke. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
- Spotka, H. 1977. Einfluss der Bodenverdichtung mittels Oberflächenrüttelgeräten auf den Erddruck einer Stützwand bei Sand. Ph D. thesis, Stuttgart.
- Van Genuchten, M.T. 1980. *Soil Science Society of America Journal* 44.5, 892.
- Vogt, N. 1983. Erdwiderstandsermittlung bei monotonen und wiederholten Wandbewegungen in Sand. Ph D. thesis, Stuttgart.
- Von Wolffersdorff, P.-A. 1996. A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials* 1.3, 251–271.
- ZTV E-StB (2017). Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (FGSV 599).